

要素実験によるミックスシールドのチャンバー圧・液面制御に関する研究

長岡技術科学大学 地盤工学研究室 大森 絵美
指導教官 杉本 光隆

1. はじめに

近年、従来の泥水による制御に加えてカッターチャンバーの坑内側にもう一つのエアチャンバーを設け、この上部にエアを導入して空気層を形成し、この空気圧を制御することにより、泥水式シールドの切羽水圧の安定をより高度に制御する方式が採用されつつある。

この空気圧制御併用の方式は、空気圧の制御と送・排泥流量による液面高さの制御により、地山側の圧力変動による切羽水圧の変動を空気の圧縮性を利用してより緩和しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究では、実験により空気併用方式の特徴・制御方法を把握し、空気併用方式の実機への適用を図ることを目的とする。

3. 実験条件

3.1 実験装置と実験の概略

本実験の位置づけは、小口径の泥水式シールドを想定した実大実験とする。本実験で得られた空気併用方式の特徴・制御方法は定式化できるので、大口径の泥水式シールドにも適用可能と考えられる。また、泥水式シールドにおける従来方式の切羽圧管理方法は確立していること、空気併用方式による切羽圧管理の課題は送排気関係であることから、本実験では、泥水の代わりに水を用いることとした。

実験装置は、泥水式シールドにおける切羽圧管理として、従来方式と空気併用方式の両方を適用できる仕様とした。図-1に実験装置フロー図を示す。

3.2 実験因子

1) 制御方式

空気併用方式の空気圧の制御方法については、送気・排気の流量、供給空気圧の設定、その制御方法等、未知の部分が多い。そこで、従来方

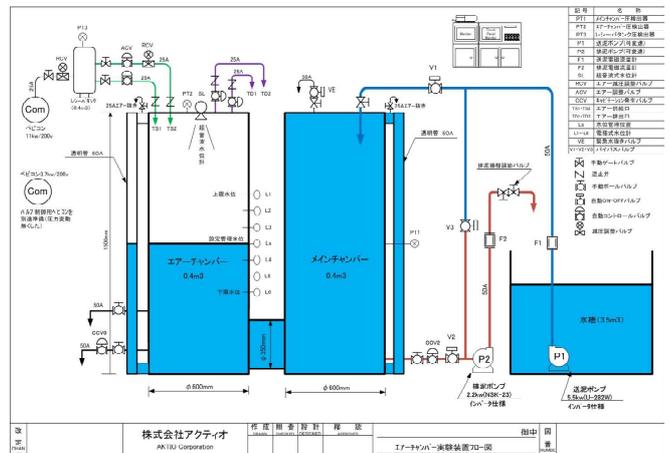


図-1 実験装置フロー図

表-1 実験結果

分類	項目	単位	Case1	Case2
検討	制御方式		従来方式	空気併用方式
ケース	送排気系統	系統	—	1
	σ_{face}	kPa	100	100
	σ_{air}	kPa	—	200
地山崩壊 (少量)	h_{min}	mm	—	-103
	h_{max}	mm	—	43
	$q_{in\ max}$	m ³ /min	0.403	0.391
	Min0	kPa	-54	-20
	Max0	kPa	11	10
地山崩壊 (大量)	h_{min}	mm	—	-264
	h_{max}	mm	—	174
	$q_{in\ max}$	m ³ /min	0.502	0.579
	Min0	kPa	-69	-22
	Max0	kPa	39	17
閉塞 キャビテーション	h_{min}	mm	—	-40
	h_{max}	mm	—	62
	$q_{in\ max}$	m ³ /min	—	—
	Min0	kPa	-26	-5
	Max0	kPa	30	9
最終	V_q	liter	110	209

式と比較して、空気併用方式の特徴・制御方法を明らか

にするため、制御方式を実験因子とした。

2) 想定事象

想定事象は、定常状態、地山崩壊(少量)、地山崩壊(大量)、閉塞キャビテーションの4つとした。

①定常状態は、切羽水圧一定を想定するとともに、実現場と同様に、バイパス還流から切羽還流への

切替え、切羽還流からバイパス還流への切替えも考慮することとした。

②地山崩壊（少量）は、切羽で地山が崩壊し、切羽水圧 100kPa で、切羽水圧が 16.7kPa 程度減少することを想定した。

③地山崩壊（大量）は、切羽で地山が大きく崩壊し、切羽水圧 100kPa で、切羽水圧が 35～40kPa 程度減少することを想定した。

④閉塞キャビテーション：排泥管が閉塞し、切羽水圧が急上昇する場合を想定した。

3.3 実験ケース

本報告では、実験因子の想定事象として、「定常状態→地山崩壊（少量）→地山崩壊（大量）→閉塞キャビテーション→定常状態」を連続的に発生させた従来方式(Case1)と空気併用方式(Case2)の2ケースを示す。

4. 実験方法

1) 従来方式

従来方式は、メインチャンバーとエアーチャンバーを満水として、通常の泥水式シールドと同様に、切羽水圧（メインチャンバー圧）(PT1) が所定の圧力となるように送泥ポンプ (P1) の送泥流量、排泥ポンプ (P2) の排泥流量を制御した。

2) 空気併用方式

空気併用方式は、メインチャンバーを満水とし、エアーチャンバーの上半部をエアーで満たして、切羽水圧 (PT1) が所定の圧力となるように、送気管のエアー減圧調整バルブ (RCV) を所定圧力（切羽水圧）に設定し、送気管のエアー調整バルブ (ACV) により送気量を制御した。さらに、液面水位が所定の位置となるように送泥ポンプ (P1) の送泥流量を制御した。

5. 計測項目

1) チャンバー関係：メインチャンバー圧、エアーチャンバー圧、エアーチャンバー水位。（以後、メインチャンバー圧をチャンバー圧、エアーチャンバー水位をチャンバー水位と呼ぶ）

2) 送排泥関係：送泥・排泥流量、送泥・排泥ポン

プの速度指令・電流・回転数・運転状況、バイパスバルブの開指令・開閉状況

3) 送排気関係：コンプレッサー圧、レシーバタンク圧

4) 地山崩壊、閉塞キャビテーション：キャビテーション発生バルブの開度・開閉状況、放出水量。放出水量は手動で、その他の計測項目は中央操作盤に設置したデータロガーで自動計測した。

6. 実験結果

実験因子がチャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ へ与える影響のメカニズムを検討するため、CCV 開度、チャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ 、供給空気圧 σ_{air} 、チャンバー水位 h 、P 速度指令、P 回転数、送排泥流量 q_{in} 、 q_{out} 、注入水量 V_q の時系列データを図-2 に示す。また、チャンバー最低水位 h_{min} 、最高水位 h_{max} 、最大送泥流量 q_{inmax} 、チャンバー最小圧変化 $Min0$ 、最大圧変化 $Max0$ 、最終注入水量 V_q を表-1 に示す。

6.1 従来方式

1) 地山崩壊

チャンバーから外部に排水が開始されると、2秒遅れて、チャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ が減少し出し、同時に、送泥流量 q_{in} が増加を開始する。その後、安定した制御がなされ、排泥が停止された後、 $\sigma_{chamber}$ が設定切羽水圧 σ_{face} に復するまでに要した時間は、地山崩壊（少量）、（大量）で、それぞれ、6秒、5秒であった。この後、 $\sigma_{chamber}$ が最大圧を示した後、設定切羽水圧 σ_{face} に復した。この間、P1 速度指令は100%以下で、注入水量 V_q は合計103 liter となった。

2) 閉塞キャビテーション

チャンバーからの排泥流量 q_{out} が減少し始めてから、3秒遅れて、チャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ が増加し出し、同時に、送泥流量 q_{in} 、排泥流量 q_{out} が減少を開始する。その後、 q_{in} 、 q_{out} はともに $0.03\text{m}^3/\text{min}$ となり、安定した制御がなされ、キャビテーションが停止された後、 $\sigma_{chamber}$ が σ_{face} に復するまでに要した時間は2秒であった。この後、 $\sigma_{chamber}$ が最小圧を示した後、設定切羽水圧 σ_{face} に復した。こ

の間、P1 速度指令は 100%以下で、P2 速度指令は 100%で、注入水量 V_q は漸増し、最終的には合計 110 liter となった。P2 速度指令 100%に対して、 $q_{out} \doteq 0$ となったのは、排泥管のキャビテーション発生バルブの開度を 15%として排泥管を閉塞した結果、 $q_{in}=0$ となった。

6.2 空気併用方式

1) 地山崩壊

①チャンバー水位：チャンバーから外部に排水が開始されると、チャンバー水位が減少し、それに伴い、送泥流量 q_{in} が急増し、注入水量 V_q が増加する。この結果、チャンバー水位が増加に転ずると、送泥流量 q_{in} は漸減し、チャンバー最高水位 > 設定値となる。この後、送泥流量 $q_{in} <$ 排泥流量 q_{out} となって、注入水量 V_q が減少し、緩やかにチャンバー水位は設定値に収束する。なお、地山崩壊（大量）の場合には、P1 速度指令が 100%となり、送泥流量 q_{in} は P1 ポンプの定格 $0.6\text{m}^3/\text{min}$ に近づく。

②チャンバー圧：チャンバーから外部に排水が開始されると、チャンバー水位の減少に伴い、チャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ も減少する。その後、送気により、チャンバー水位 < 設定値で、 $\sigma_{chamber} = \sigma_{face}$ となった後、チャンバー水位の増加に伴い、チャンバー圧最大値 $> \sigma_{face}$ となる。さらに、排気により、チャンバー水位 > 設定値で、 $\sigma_{chamber} = \sigma_{face}$ に収束する。

③供給空気圧（レシーバタンク圧）：供給空気圧 σ_{air} は、チャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ の減少に少し遅れて減少し出し、 $\sigma_{chamber}$ が増加に転じてから最小値を取り、その後、設定供給空気圧 σ_{air} に復する。

2) 閉塞キャビテーション

①チャンバー水位：閉塞キャビテーション開始により、チャンバー水位は増加するが、送泥流量 q_{in} が急減し、 $0 \doteq$ 送泥流量 $q_{in} <$ 排泥流量 q_{out} となって、注入水量 V_q が減少し、チャンバー水位は漸減する。閉塞キャビテーション終了後、排泥流量 $q_{out} =$ 設定値となり、チャンバー水位は急減し、チャ

ンバー水位 < 設定値となる。数秒後に、送泥流量 q_{in} が急増し、送泥流量 $q_{in} >$ 排泥流量 q_{out} となって、注入水量 V_q が増加に転じ、チャンバー水位は設定値に復する。

②チャンバー圧：閉塞キャビテーション開始数秒後に、チャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ は最大値を取るが、すぐに、 $\sigma_{chamber} \doteq \sigma_{face}$ となり、閉塞キャビテーション終了後、チャンバー水位が最小値を取る前に、チャンバー圧 $\sigma_{chamber}$ は最小値を取る。その後、すぐに、 $\sigma_{chamber} \doteq \sigma_{face}$ となる。

6.3 従来方式と空気併用方式の比較

1) 地山崩壊：従来方式より空気併用方式の方が、チャンバー最小圧が大きく（最小圧偏差 > 0 ）、最大圧は小さく（最大圧偏差 < 0 ）、その結果、チャンバー圧力差は小さく（圧力差偏差 < 0 ）になった。この傾向は、地山崩壊（大量）の方が大きい。

2) 閉塞キャビテーション：地山崩壊と同様に、従来方式より空気併用方式の方がチャンバー最大圧が小さく、最小圧は大きく、その結果、チャンバー圧力差は小さくなった。

7. 考察

従来方式と空気併用方式のチャンバー圧制御メカニズムは以下のように考えられる。

1) 地山崩壊

従来方式：チャンバーから外部に排水すると、泥水の体積減少 ΔV に伴い、 $\sigma_{chamber}$ が減少する。 $\sigma_{chamber}$ 減少を検知し、送泥ポンプ P1 へ指令（P1 速度指令）を出し、P1 の回転数（P1 回転数）を上げ、送泥流量 q_{in} を増加させる。その結果、注入水量 V_q が増加する。これによって、 $\sigma_{chamber}$ を増加させ、 $\sigma_{chamber}$ が σ_{face} に復するように制御する。

空気併用方式：チャンバーから外部に排水すると、泥水の体積減少 ΔV に伴い、チャンバー水位 h が低下する。これに伴い、エアーチャンバーの空気が膨張し、 $\sigma_{chamber}$ が減少する。 h 低下を検知し、送泥ポンプ P1 へ指令を出し、P1 の回転数を上げ、送泥流量 q_{in} を増加させる。その結果、注入水量 V_q が増加する。これによって、 h を上昇させ、 h

が設定値に復するように制御する。 $\sigma_{\text{chamber}} >$ 設定切羽水圧 σ_{face} となった場合には、排気流量が増加し、 $\sigma_{\text{chamber}} = \sigma_{\text{face}}$ に収束する。

2) 閉塞キャビテーション

従来方式：キャビテーションバルブ (CCV2) を所定の開度、設定時間で閉め、チャンバーからの排泥流量を減少させる。その結果、 σ_{chamber} が増加すると、送泥ポンプ P1 へ指令を出し、P1 の回転数を下げ、送泥流量 q_{in} を減少させるとともに、排泥ポンプ P2 へ指令 (P2 速度指令) を出し、P2

の回転数 (P2 回転数) を上げ、排泥流量 q_{out} を増加させる。これによって、 σ_{chamber} を減少させ、 σ_{chamber} が σ_{face} に復するように制御する。

空気併用方式：地山崩壊とほぼ同様。

8. まとめ

従来方式と空気併用方式による地山崩壊、閉塞キャビテーションの制御メカニズムを明らかにするとともに、従来方式より空気併用方式の方がチャンバー圧変動抑制効果が大きいことを確認した。

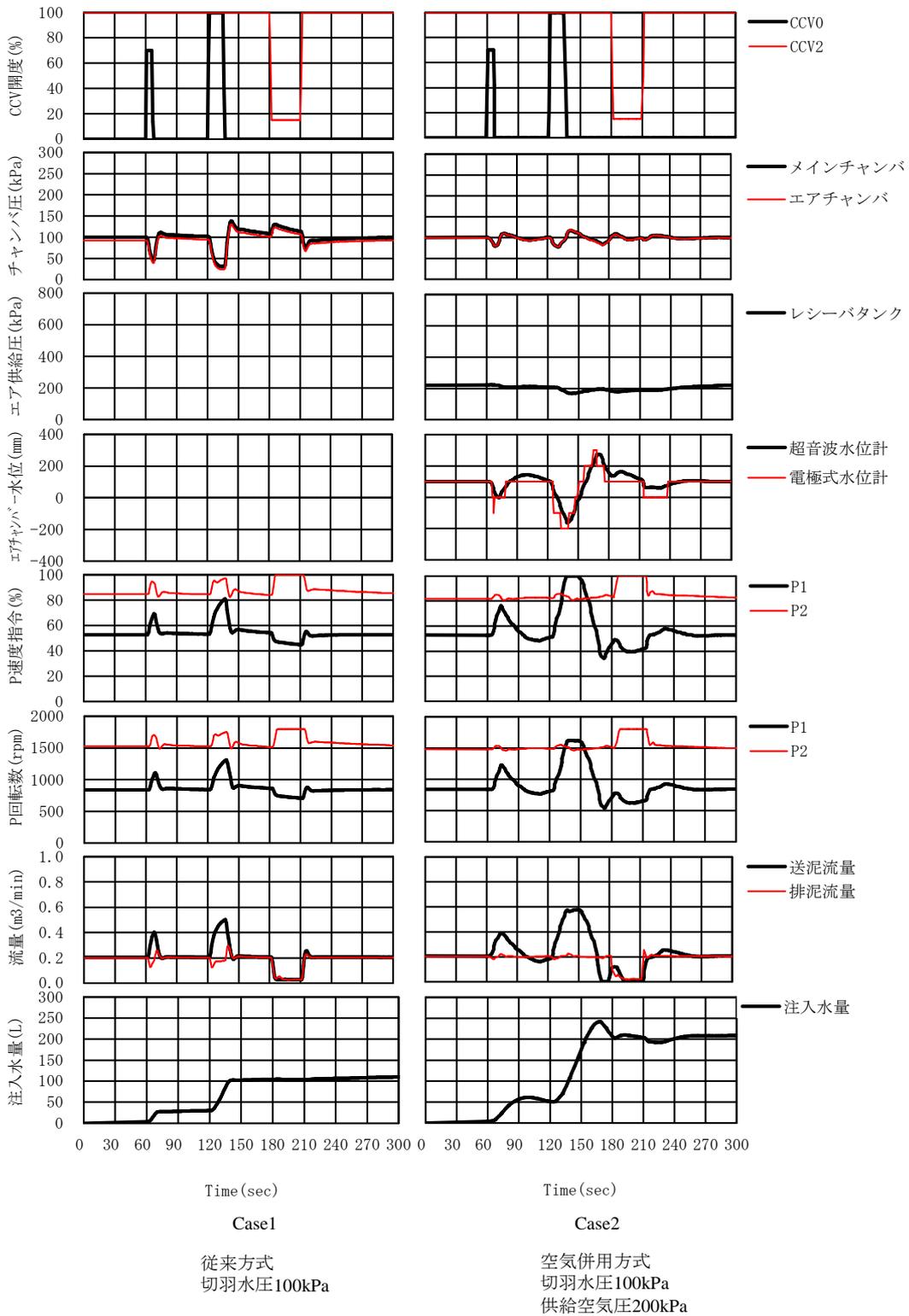


図-2 計測データの時系列変化